

深部巷道能量吸收型支护技术研究进展

许 镜, 张 帅

湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年6月18日; 录用日期: 2026年7月19日; 发布日期: 2026年7月28日

摘 要

深部开采条件下, 动压巷道冲击地压灾害是制约矿山安全生产的关键难题。文章首先聚焦能量吸收型支护体系, 梳理围岩破坏机理与能量判据, 总结支护设计理念的演变历程。其次, 系统分析NPR恒阻锚杆、D-Bolt滑移锚杆、阻尼缓冲构件、超高强套接锚杆四类核心支护单元的工作原理、技术优势与应用短板, 结合超载冲击破坏准则、叠加拱理论阐述多级协同支护设计原则, 并介绍吸能支架、混凝土支柱等极限承载技术与多模态智能预警体系。研究表明, 锚杆与锚索延伸率不匹配、锚固界面脱粘是支护失效的主要诱因; 现有吸能支护技术在循环耐久性、多轴受力工况适配、系统协同量化设计等方面仍存在明显短板。最后, 梳理当前研究瓶颈, 并对该领域未来发展方向进行展望。

关键词

深部开采, 动压巷道, 冲击地压, 能量吸收支护, 让压支护, 锚固结构

Research Progress on Energy-Absorbing Support Technology for Deep Dynamic Pressure Roadways

Jing Xu, Shuai Zhang

School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: June 18, 2026; accepted: July 19, 2026; published: July 28, 2026

Abstract

Under deep mining conditions, rock burst disasters in dynamic pressure roadways pose a critical challenge to mine safety. Firstly, this paper focuses on energy-absorbing support systems, reviews the failure mechanisms of surrounding rock and energy criteria, and summarizes the evolution of

support design philosophies. Secondly, it systematically analyzes the working principles, technical advantages, and limitations of four core energy-absorbing support units: NPR constant-resistance bolts, D-Bolt sliding bolts, damping energy-absorbing components, and ultra-high-strength coupled bolts. Combined with the overloading rock burst criterion and the superimposed arch theory, the design principles of multi-level collaborative support systems are elaborated. The paper also introduces ultimate bearing technologies such as energy-absorbing supports and concrete pillars, as well as a multi-modal intelligent early warning system. Research indicates that the mismatch in elongation between rock bolts and cables, along with debonding at the anchoring interface, are the main causes of support failure. Current energy-absorbing support technologies still exhibit significant shortcomings in cyclic durability, adaptability to multi-axial loading conditions, and quantitative design of system synergy. Finally, the study identifies existing research bottlenecks and discusses future development directions in this field.

Keywords

Deep Mining, Dynamic Pressure Roadway, Rock Burst, Energy-Absorbing Support, Yielding Support, Anchorage Structure

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

随着浅部矿产资源逐步枯竭, 矿山开采持续向深部延伸。深部岩体高地应力、强采动扰动与复杂地质构造叠加作用, 导致动压巷道冲击地压灾害频发。冲击荷载具备突发性、高能量密度、难以精准预判等特征, 对巷道支护系统提出了严苛要求。

传统高强度、高刚度刚性支护体系在静态荷载下应用效果良好, 但在冲击荷载作用下, 无法快速耗散岩体瞬时释放的弹性应变能, 极易发生脆性断裂、整体失稳等问题, 巷道返修率长期居高不下。

能量吸收型支护依靠结构可控变形、材料塑性变形主动消解冲击动能, 现已成为深部动压巷道围岩控制领域的主流研究方向。已有研究表明, 多重采动扰动会大幅降低巷道临界冲击破坏能量。因此, 探究能量吸收支护作用机制及其与围岩的协同作用规律, 具备重要的理论价值与工程意义。

1.2. 研究边界与评述范围

本文研究范围限定为深部动压巷道冲击地压防控领域, 围绕 NPR 恒阻锚杆、D-Bolt 滑移锚杆、阻尼缓冲构件、新型超高强套接锚杆四类核心吸能支护单元展开评述, 同时补充吸能支架、混凝土支柱作为多级防护体系的重要组成部分, 分析各类技术的适用条件、工程缺陷与优化方向。

2. 深部动压巷道围岩破坏机理与能量判据

2.1. 冲击地压的能量学解释

冲击地压发生的本质, 是围岩系统积聚的弹性应变能超出支护体系的耗能极限, 剩余能量以动能形式瞬时释放。受围岩储能分布不均、能量释放模式多样等因素影响, 纯理论能量判据在工程落地中存在一定局限性。

焦建康[1]提出锚固承载结构超载冲击破坏准则：应力超载是冲击发生的必要条件，即动载与静载叠加后的总强度超过结构承载能力；能量超载是充分条件，即矿震余能与围岩释放弹性能之和大于支护系统总耗能，盈余能量将转化为冲击动能。徐东等[2]研究证实，多重采动扰动会降低巷道临界冲击破坏能量，前期扰动会显著削弱围岩整体抗冲击能力。

2.2. 围岩破坏模式分类

吸动压巷道围岩冲击破坏可划分为张拉型、剪切型和混合型三类，各类模式的力学特征与危害如表 1 所示。现场监测发现，多重扰动下围岩偏应力会发生旋转，巷道肩角、底角区域易演变为薄弱破坏带[2]。

Table 1. Failure mode characteristics of surrounding rock under rock burst in dynamic pressure roadways
表 1. 动压巷道围岩冲击破坏模式特征

破坏模式	力学机制	对支护的主要威胁
张拉型	拉应力超限	锚杆受拉断裂
剪切型	沿弱面滑移	锚杆受剪、结构错位
混合型	拉剪复合	耦合失效、大范围失稳

2.3. 冲击荷载下围岩 - 支护相互作用

冲击荷载具有加载速率高、围岩变形突跳等特点，岩体与支护材料动态强度有所提升，但延性明显下降，基于静载条件建立的支护设计方法无法直接套用。

焦建康[1]揭示了锚固承载结构的冲击破坏演化链条：顶板动载扰动→浅部围岩损伤→锚固系统失效→深部围岩失去约束→破坏范围扩大→深部弹性能集中释放→支护结构整体冲击破坏。该演化规律表明，锚固系统提前失效是诱发巷道冲击破坏的核心环节。

3. 巷道支护设计理念发展历程

深部动压巷道支护设计理念历经三个迭代阶段，各阶段设计思路、代表技术与现存问题如表 2 所示。刚性抗冲模式依靠提升结构强度抵御冲击，普遍存在脆性破坏问题；让压卸压模式允许围岩可控变形释放能量，但难以平衡让压量与抗冲击能力；现阶段主流的能量吸收模式，通过构件塑性变形将冲击动能转化为热能耗散，其工程应用瓶颈主要为造价偏高、长期服役耐久性有待验证。

Table 2. Evolution of support design philosophy for dynamic pressure roadways
表 2. 动压巷道支护设计理念演变

阶段	设计理念	代表技术	现存主要问题
早期	刚性抗冲	重型 U 型钢、高密度锚索	脆性断裂
中期	让压卸压	可缩支架、卸压孔	让压与抗冲能力难以协调
后期	能量吸收	吸能锚杆、缓冲层	建设成本高，耐久性待验证

4. 典型能量吸收型支护单元技术分析

4.1. NPR 恒阻锚杆

工作原理：NPR (Negative Poisson’s Ratio)负泊松比恒阻锚杆是一类可实现恒阻大变形的吸能构件，

核心部件为让压套筒。当杆体轴向拉力达到设计阈值[3]时, 套筒产生塑性扩径变形, 使锚杆在维持近似恒定工作阻力的同时持续伸长。该结构可将冲击动能转化为套筒塑性变形能, 有效避免杆体因应力集中发生脆性断裂。

关键技术特点: NPR 锚杆力-变形曲线拥有稳定的平台段, 大变形能力与整体耗能性能远优于传统普通锚杆, 可适应围岩大变形与冲击突跳, 在变形过程中始终保持对围岩的持续支护力。目前该锚杆已在多个深部矿区开展现场试验, 工程适用性得到初步验证[4][5]。

适用条件与局限性: NPR 锚杆更适配以轴向拉伸为主的冲击工况, 例如顶板张拉型破坏主导的巷道。该技术存在以下局限: 构件恒阻特性对加载速率较为敏感, 高速冲击下实际工作阻力易偏离设计值; 理论设计以单一轴向拉伸为前提, 承受剪切荷载时吸能效率明显降低; 经历多次冲击后, 滑动界面会产生磨损, 在井下湿热环境中, 锈蚀产物还会增大滑动阻力。因此在剪切作用显著、反复受荷的复杂巷道中, 其综合应用效果仍需进一步验证[6]。

4.2. D-Bolt 滑移锚杆

工作原理: D-Bolt 滑移锚杆依靠多组独立滑移节点实现让压吸能, 杆体锚固段与自由段可产生相对滑移。当围岩变形超出弹性范围时, 滑移节点发生可控滑移, 以此实现大变形条件下的让压功能。该构件无需复杂让压套筒, 整体结构简洁[7]。

关键技术特点: D-Bolt 对拉伸、剪切等复杂围岩变形模式敏感度较低, 变形适应能力较强; 可通过增减滑移节点数量灵活调整延伸能力, 制造成本相对低廉, 在深部高应力、动压巷道中具备应用潜力。

适用条件与局限性: 该锚杆适用于对让压过程连续性要求不高的工程工况。其技术短板主要包括: 滑移现象优先在结构薄弱节点发生, 吸能过程呈阶梯式跳跃变化, 无法形成连续稳定的恒阻平台; 节点刚度突变易引发应力波反射, 造成锚杆端部应力集中, 诱发局部破坏; 目前国内规模化现场应用案例较少, 构件抗反复冲击能力与长期服役稳定性仍缺乏实测数据支撑。

4.3. 阻尼缓冲构件

工作原理: 阻尼缓冲构件[8]属于非锚固类吸能结构, 多布置于巷道表层或衬砌内部, 作为锚固支护系统的辅助防护手段。工程中主要分为两类: 一类为液压阻尼器, 依托流体节流原理耗能; 另一类为泡沫铝、聚氨酯泡沫等多孔缓冲层, 依靠泡孔壁屈曲、坍塌吸收冲击能量。

关键技术特点: 缓冲构件布置方式灵活, 可针对巷道危险区域差异化布设; 单位面积耗能能力优于锚杆类构件, 且局部损坏后可单独更换, 后期运维便捷。其中液压阻尼器响应速度较快, 适合控制冲击初期的能量释放[9]。

适用条件与局限性: 阻尼缓冲构件常作为多级防护体系的第一级, 承担初期耗能作用。应用局限如下: 缓冲层启动承载应力偏低, 常规采动压力下便会产生压缩变形, 若巷道服役中后期发生冲击灾害, 构件剩余吸能空间将大幅缩减; 增设缓冲层会改变巷道表层支护刚度, 设计不合理易造成锚杆托盘应力集中; 液压阻尼器存在响应延迟问题, 面对上升速率极快的冲击荷载时, 难以及时发挥耗能作用。

4.4. 新型超高强套接锚杆

工作原理: 针对常规锚索延伸率偏低、与锚杆变形不协调进而引发协同支护失效的问题, 焦建康[1]研发出超高强、高冲击韧性套接锚杆。该锚杆采用 BHTB700 等热处理高强度钢材制作杆体, 通过直螺纹套筒完成多段杆体接长, 套筒连接件与杆体实现等强设计, 兼顾结构强度与延展性能。

关键技术特点: 套接锚杆破断载荷与常规锚索基本相当, 延伸率、冲击吸收功则显著优于锚索, 实现了高强度与高延性的统一。动载作用下, 该构件既可提供稳定支护阻力, 又能通过塑性变形吸收冲击

能量，弥补了普通锚索“强而不韧”、普通锚杆“韧而不强”的缺陷。理论上该锚杆可替代常规锚索应用于深部动压巷道，规避锚杆与锚索延伸率不匹配带来的应力集中问题。

适用条件与局限性：套接锚杆适用于对延伸率、抗冲击性能要求较高的深部动压巷道。目前该构件仅完成室内动静载力学试验与数值模拟分析，煤矿深部动压巷道规模化现场应用案例较少，长期抗腐蚀性能、施工便捷性仍需依托工程实践进一步检验。

四类主流吸能支护单元的工作原理、优势、短板与适用场景汇总如表 3 所示。

Table 3. Comparison of four types of energy-absorbing support unit technologies
表 3. 四类吸能支护单元技术对比

技术类型	工作原理	核心优势	主要局限	适用条件
NPR 恒阻锚杆	让压套筒塑性扩径	恒阻平台稳定，大变形能力强	加载速率敏感，剪切工况效率下降	轴向拉伸为主的冲击
D-Bolt 滑移锚杆	多节点滑移让压	结构简洁，变形适应性强	滑移阶梯跳跃，端部应力集中	对让压连续性要求不高
阻尼缓冲构件	流体节流/泡孔压缩	布置灵活，单位面积耗能高	超前压溃，响应延迟	多级防护的第一级
套接锚杆	等强套筒 + 高强杆体	高强高延统一，可替代锚索	现场应用少，长期性能待验证	高延伸率要求工况

5. 多级协同吸能支护系统集成设计

5.1. 分级防护设计原则

焦建康[1]提出“降载 - 抗冲 - 吸能”三位一体控制原理：降载即降低锚固承载结构承受的载荷与能量；抗冲即提升支护结构自身抗冲击能力；吸能即强化系统整体耗能特性。多级防护体系的功能划分如表 4 所示。

Table 4. Functional division of the three-level collaborative energy-absorbing support system
表 4. 三级协同吸能支护体系功能划分

层级	质量	代表技术
第一级	初期承载	缓冲吸能层
第二级	主体耗能	NPR/D-Bolt/套接锚杆
第三级	极限承载	高强锚索、U 型钢支架、吸能支架、混凝土支柱

5.2. 刚度匹配与叠加拱协同机制

多级吸能支护体系的核心设计难点在于力学耦合匹配。设缓冲层刚度为 k_1 ，锚杆支护体系刚度为 k_2 ，围岩等效刚度为 k_3 ，冲击荷载下三者呈串联承载关系，系统总刚度 K 计算公式如式(1)所示：

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \tag{1}$$

由公式可知：若缓冲层刚度过低，变形将集中于缓冲层，锚杆受力出现滞后；若缓冲层刚度过高，则无法发挥让压卸压作用。理论上理想刚度匹配关系为 $k_1 < k_2 < k_3$ ，目前针对不同冲击强度、不同围岩条件的量化匹配准则仍处于探索阶段。

针对锚杆与锚索联合支护体系，余伟健等[10]提出叠加拱理论：锚杆形成主压缩拱，锚索形成次压缩

拱, 二者依靠刚度差异实现分级承载, 为锚索协同设计提供了理论依据。

5.3. 协同防控技术案例

徐东等[2]针对多重扰动动压巷道, 提出了“立体式卸压 + 全断面靶向支护”协同技术。卸压措施包括低位水力压裂切顶、中高位超长钻孔压裂及底板断底爆破, 以降低应力集中与冲击能量; 支护采用长短锚索成层式结构, 配合帮部与肩底角强化支护。现场应用表明, 该技术显著降低了巷道变形量与应力水平, 围岩稳定性明显提升。

5.4. 吸能支架的防冲耗能特性研究

作为三级防护体系中承担极限承载作用的重要结构, 吸能液压支架在冲击地压防控中得到广泛应用。罗廷运[11]采用数值模拟手段, 分析了不同冲击能量、冲击速度、工作阻力下吸能支架的防冲性能。

研究结果显示, 相较于普通支架, 吸能支架的整体位移与塑性变形能显著降低; 吸能装置依靠可控塑性压溃吸收大量冲击动能, 对支架主体形成有效保护。当吸能装置工作阻力处于合理区间时, 支架塑性区面积最小、塑性能最低; 采用高强度钢材、加厚壁厚的吸能装置综合防冲性能最优[11]。此外, 在吸能支架内增设阻尼装置可进一步削减结构塑性能与整体动能, 阻尼系数需匹配工况选取合理区间。

吸能支架的设计思路为“柔性吸能 + 刚性承载”, 是三级防护体系第三层级的有效实现形式。

5.5. 锚杆(索)与混凝土支柱的联合支护应用

除金属类吸能支架外, 混凝土支柱与锚杆(索)组合支护, 是特殊采动工况下第三级防护的有效补充。

综采工作面末采回撤通道需承受上覆岩层破断产生的强采动压力, 胡滨等[12]将锚杆(索)内部支护与混凝土支柱外部让压构件结合应用。混凝土支柱顶部预留变形空间并填充高密度垫板, 顶板下沉过程中垫板率先压缩变形实现让压吸能, 与锚杆(索)形成内外协同支护体系。

现场实践表明, 该联合支护方案可有效控制回撤通道顶板下沉; 支柱经让压变形后结构完整性良好, 且可直接被采煤机破碎外运, 省去传统垛式支架反复挪移工序, 大幅提升工作面末采回撤效率[13], 为特殊工况下多级协同支护设计提供了实践参考。

6. 多模态智能预警体系

6.1. 多参量监测技术体系

为实现冲击地压超前防控与支护状态动态评估, 现场已形成多技术融合的综合监测体系。微震监测可实现大范围岩体破裂定位与能量估算, 但对小能量破裂事件识别能力不足; 光纤传感技术具备分布式测量、抗电磁干扰、传输距离长等优势, 可连续采集围岩应变分布数据; 锚杆受力监测为单点高精度监测, 可直接评判支护构件工作状态; 多点位移计用于测定围岩内部位移与松动圈范围; 电磁波 CT 扫描可定量分析动载作用下锚固结构的损伤劣化程度[14]。

6.2. 冲击地压预警方法

现阶段冲击地压预警方法主要分为阈值触发、统计学习、机器学习、多模态数据融合[15]四类。阈值触发法依托能量、位移等指标预设报警阈值, 原理简单、部署便捷, 但误报率偏高; 统计学习法以贝叶斯、逻辑回归模型为代表, 可量化冲击发生概率, 预警效果依赖历史数据质量; 机器学习法包含随机森林、LSTM 等算法, 预测精度较高, 但模型可解释性较弱, 需要海量样本完成训练; 工程中常采用多方法融合模式, 弥补单一技术的缺陷。

吕小亮[16]提出融合微震、地音、应力、电磁辐射、图像五类数据的智能预警模型。该模型将图像数据转化为围岩变形场与红外温度场,构建时空同步特征向量,结合 Transformer 网络捕捉多源数据时序关联,并引入信息熵动态赋权,适配采掘过程中地质与应力状态的动态变化。

现场试验表明,该多模态融合模型综合预警指标显著优于传统单一微震预警法,误报率与漏报率分别控制在 12%、7%左右[16]。多物理场综合评判模式,能够有效追踪深部矿井能量累积与转移规律,具备良好的工程适用性。各类预警方法的特点对比如表 5 所示。

Table 5. System resulting data of standard experiment
表 5. 标准试验系统结果数据

方法类型	质量	排序	稿件
阈值触发	预设单一指标阈值	简单易部署	误报率高,难以适应动态变化
统计学习	贝叶斯、逻辑回归	可量化概率	依赖历史数据质量
机器学习	随机森林、LSTM 等	精度高,捕捉非线性特征	可解释性弱,需大量样本
多模态融合	Transformer + 信息熵动态赋权	Transformer + 信息熵动态赋权	对多源数据同步性要求高

6.3. 监测 - 预警 - 控制闭环体系

完整的智能闭环控制流程为:信息感知→数据传输→数据分析→风险决策→支护调控→效果反馈。目前该体系存在核心时序矛盾:冲击荷载发展时长为毫秒级,而现有智能系统决策响应为秒级,二者难以匹配。行业内主要通过部署边缘计算、轻量化人工智能模型、预设自适应触发机制等方式缩短响应时间。现场监测数据表明,锚杆(索)轴力损失率随震源距离增大而衰减,随预紧力提升而减小[6]。

7. 现存关键问题与未来展望

7.1. 当前研究瓶颈

综合理论研究、材料研发、系统集成、工程应用全链条,现阶段能量吸收型支护体系存在多项突出问题,具体汇总如表 6 所示。

Table 6. Current research bottlenecks of energy-absorbing support systems
表 6. 能量吸收型支护体系当前研究瓶颈

类别	具体问题
理论模型	缺乏拉 - 剪 - 扭复合应力路径下支护构件统一吸能机理
支护材料	锚杆与锚索延伸率不匹配;锚固剂 - 孔壁第二界面易发生脱粘失效
系统集成	多级防护体系的时序协同、刚度匹配缺少量化设计准则
工程经济	高性能吸能支护方案、智能监测系统造价偏高,推广受限

7.2. 未来研究方向

结合现有瓶颈,后续重点研究方向归纳如下:开展复杂复合应力工况下构件吸能机理试验与理论研究;研发高耐久复合支护材料,解决锚索延伸率不匹配、界面脱粘等问题;建立多级协同支护量化设计体系;攻关毫秒级响应的智能自适应支护技术;推进模块化支护结构研发与行业标准制定,实现降本增效。

8. 结论

1) 深部动压巷道支护技术已全面进入能量吸收发展阶段, 多级分层吸能、时空时序协同是防控冲击地压的有效技术路线。多重采动扰动会显著降低巷道临界冲击破坏能量, 加剧灾害风险。

2) NPR 恒阻锚杆适用于轴向拉伸为主的冲击工况; D-Bolt 滑移锚杆结构简洁, 但滑移过程稳定性不足; 阻尼缓冲构件整体吸能容量大, 易出现超前压溃问题; 超高强套接锚杆实现了高强与高延性能的统一, 大规模工程应用仍需持续验证; 吸能支架依靠塑性压溃与阻尼耗能, 可作为第三级极限承载结构; 混凝土支柱与锚杆(索)联合支护, 在工作面末采回撤通道等特殊工况中展现出良好的协同让压效果。

3) 动载扰动下锚固承载结构超载冲击破坏准则, 为吸能支护设计提供了重要理论依据。锚杆与锚索延伸率不匹配、锚固第二界面脱粘失效, 是现阶段支护结构破坏的主要诱因。

4) 后续研究需重点围绕复合应力下吸能机理、高耐久支护材料、多级系统协同设计、毫秒级智能调控四大方向开展攻关, 推动能量吸收型支护技术向标准化、低成本、智能化方向发展。

参考文献

- [1] 焦建康, 鞠文君. 动载扰动下巷道锚固承载结构冲击破坏机制[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 94-105.
- [2] 徐东, 王薪旭, 高明仕, 等. 多重扰动动压巷道围岩应力时变演化破坏机制[J]. 岩土力学, 2026(10): 1-19.
- [3] 胡杰, 丁玉祥, 何满潮, 等. 冲击荷载下第二代 NPR 锚杆与 HPB235 锚杆力学特性差异分析[J/OL]. 金属矿山, 1-17. <https://link.cnki.net/urlid/34.1055.td.20260527.1137.002>, 2026-06-02.
- [4] 何满潮, 李晨, 宫伟力, 等. NPR 锚杆/索支护原理及大变形控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1513-1529.
- [5] 刘学生, 范德源, 宋虎, 等. 深部动压巷道锚固围岩震动波衰减机制及协同抗震支护设计方法[J/OL]. 煤炭学报, 1-15. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0585>, 2026-06-02.
- [6] 王炯, 姜健, 王思语, 等. NPR 锚固砂岩冲击动力学特性试验[J]. 煤炭科学技术, 2026, 54(2): 207-219.
- [7] 侯焯, 杨朝帅, 丁玉祥, 等. 深埋隧洞岩爆防控三维 NPR 主动支护体系[J]. 隧道建设(中英文), 2026, 46(4): 852-868.
- [8] 潘一山, 吕祥锋, 李忠华. 吸能耦合支护模型在冲击地压巷道中应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 6-10.
- [9] 王凯兴, 潘一山. 冲击地压矿井的围岩与支护统一吸能防冲理论[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2585-2590.
- [10] 余伟健, 高谦, 朱川曲. 深部软弱围岩叠加拱承载体强度理论及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2134-2142.
- [11] 罗廷运. 冲击地压巷道吸能支架防冲耗能特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北方工业大学, 2025.
- [12] 胡滨, 王志超, 张晓. 混凝土支柱与锚杆(索)联合支护系统应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4): 91-98.
- [13] 康红普, 吴拥政, 何杰, 等. 深部冲击地压巷道锚杆支护作用研究与实践[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2225-2233.
- [14] 吴拥政, 康红普, 丁吉, 等. 超高热处理锚杆开发与实践[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 308-313.
- [15] 付天予, 杨小彬, 胡慢谷, 等. 时空融合与多模态驱动的冲击地压预测研究[J]. 中国矿业大学学报, 2026, 55(3): 877-896.
- [16] 吕小亮. 多模态数据融合的冲击地压智能预警模型构建[J]. 山东煤炭科技, 2026, 44(4): 186-189+194.